

Geschwächte Welle-Nabe-Verbindungen auf dem Prüfstand

Birkholz, H.; Garzke, M.; Grünendick, T.; Schäfer, G.

Aufgrund ihrer einfachen Montage und Fertigung und der Möglichkeit der konstruktiven Ankopplung an benachbarte Aggregate haben Welle-Nabe-Pressverbindungen eine herausragende Stellung und eine nachgewiesene hohe Akzeptanz im Maschinen- und Anlagebau erlangt. Konstruktiv bedingte Störungen stellen bezüglich der Übertragungsfähigkeit und der Haltbarkeit Schwachstellen dar.

Due to simple assembly and production and the possibility of the coupling to neighbouring aggregates shrink fits attained an outstanding position as well as a proven high acceptance in the machine and plant construction. Constructionally conditioned interferences represent weak points concerning the transmission and the durability.

1 Einleitung

In der Antriebstechnik stellen Pressverbindungen bei der Übertragung hoher und wechselnder sowie umlaufender Kraftgrößen die am häufigsten eingesetzten Welle-Nabe-Verbindungen dar /1/. Vielfältige Veröffentlichungen zeugen von dem Bemühen, diese Verbindung noch leistungsfähiger zu gestalten und Schadensfälle durch eine gezielte Auslegung bereits im Konstruktionsstadium zu vermeiden. Die Berechnung des Übertragungsverhaltens und der Spannungen in Schrumpfverbindungen und Kegelpressverbindungen für ungeschwächte Kreisquerschnitte von Welle und Nabe kann bei elastischer und teilplastischer Materialbeanspruchung als bekannt vorausgesetzt werden und wird durch experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung des Dauerschwingfestigkeits-, Reibdauerbruch- und Verschleißverhaltens weiter abgerundet /2, 3, 4, 5/.

Dagegen mangelt es an Erkenntnissen bezüglich der Verbindungen, bei denen Radialbohrungen (z.B. bei Pressölverbänden) oder bei denen in Welle und Nabe exzentrische Axialbohrungen eingebracht werden (z.B. für Schmier- und Druckmittelzufuhr bei Kupplungen, Flanschbohrungen, Schraubenbefestigungen bei Spannringverbindungen usw.). Eine Auswahl derartiger geschwächter Welle-Nabe-Verbindungen stellt **Bild 1** schematisch dar. Die konstruktiv

bedingten Schwächungen beeinflussen das elastische Verhalten von Welle und Nabe zum Teil so stark, dass der für die Berechnung ungeschwächter rotationssymmetrischer Pressverbindungen zugrundeliegende ebene Spannungszustand als fragwürdig angesehen werden muss, zumal es in der Vergangenheit schon mehrfach zu Schäden an geschwächten Verbindungen gekommen ist /6/.

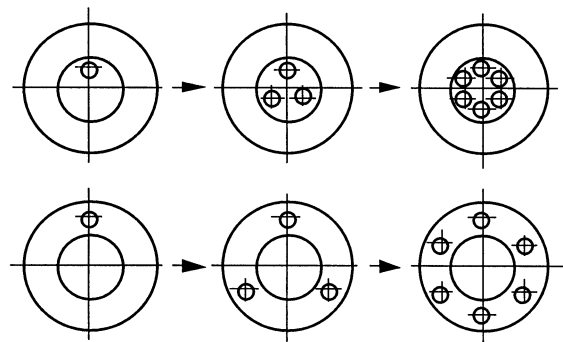


Bild 1: Übersicht über geschwächte Welle-Nabe-Verbindungen /6/

2 Übertragungsfähigkeit und durchschnittlicher Fugendruck

Die durch die Schwächung eintretende örtliche Veränderung des Fugendrucks muss bei der Berechnung der Übertragungsfähigkeit berücksichtigt werden, **Gleichung (1)**. Man kann zur Verwendung der Gleichungen der rotationssymmetrischen Verbindung einen durchschnittlichen Fugendruck bilden (**Gleichung (2)**), der aus dem Integralmittel über dem Umfang definiert wird. Der Fugendruck weist über der Bohrung bei $\varphi=0^\circ$ einen Einbruch auf und stellt damit eine besondere Gefährdung bei Reibkorrosion dar /1/.

$$T = \int_0^{2\pi} \bar{p} \cdot r_f^2 \cdot L \cdot \mu_{\text{betrieb}} \cdot d\varphi \quad (1)$$

$$\bar{p} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{2\pi} p \cdot d\varphi \quad (2)$$

2.1 Elastische Auslegung geschwächter Pressverbindungen

Die Verminderung des Fugendrucks infolge der Schwächung von Welle oder Nabe führt einerseits zu einer Spannungsüberhöhung im Bereich der eingebrachten Schwächungen und andererseits zu einer Reduzierung des übertragbaren Drehmoments. Zur Ermittlung der Beanspruchungen und Übertragungseigenschaften im elastischen Bereich sind umfangreiche Untersuchungen durchgeführt worden, deren Ergebnisse in Kennzahlendiagrammen dargestellt sind [6]. Im folgenden sollen die Ergebnisse an einigen charakteristischen Beispielen erläutert werden.

Grundlage der Vergleichsspannungsberechnung ist die Gestaltänderungsenergiehypothese. Zur Auslegung der geschwächten Verbindung auf Basis der rotationssymmetrischen Verbindung wird die maximale Spannung unter Einführung einer Formzahl α_k berechnet, **Gleichung (3)**. Die Formzahl ist von der Geometrie der Verbindung und den Montagebedingungen abhängig. Für die Bestimmung der Übertragungsfähigkeit eines geschwächten Pressverbandes lässt sich die Übertragungsfähigkeitskennzahl η ableiten, **Gleichung (4)**.

$$\alpha_k = \frac{\sigma_{vmax}}{\sigma_{vungestört}} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{T}{T_{ungestört}} = \frac{\int_0^{2\pi} p \cdot r_f^2 \cdot L \cdot \mu_{betrieb} \cdot d\varphi}{\int_0^{2\pi} q \cdot r_f^2 \cdot L \cdot \mu_{betrieb} \cdot d\varphi} = \frac{\bar{p}}{\bar{q}} \quad (4)$$

2.1.1 Welle mit Axialbohrungen

Zahlreiche Untersuchungen ergaben bei zutreffender Vereinfachung, dass der durchschnittliche Fugendruck p praktisch unabhängig von der Exzentrizität e und der Montagereibungszahl $\mu_{montage}$ ist, er wird nur vom gesamten Bohrungsquerschnitt $n\pi r_b^2$ beeinflusst, **Bild 2**. Die Anwendbarkeit findet dann eine Grenze, wenn die Restwandstärke einer Bohrung so klein ist, dass es zu plastischen Verformungen kommt.

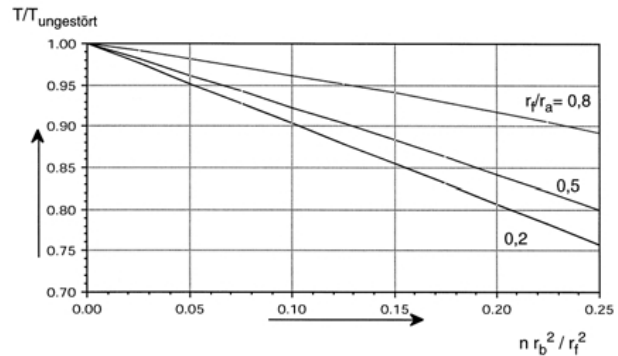


Bild 2: Übertragungsfähigkeit für Wellen mit Axialbohrungen

2.1.2 Nabe mit Axialbohrungen

Die an den Wellen mit Axialbohrungen gezeigten Zusammenhänge der Beanspruchungs- und Pressfugendruckverteilung lassen sich von den physikalischen Zusammenhängen her auch auf Naben mit Axialbohrungen übertragen, wobei der Montagezustand der geschwächten Naben eine weit geringere Rolle spielt als bei geschwächten Wellen. Die maximalen Bohrungsrandspannungen der durch Axialbohrungen geschwächten Nabe liegen immer an dem zur Fügefläche nächstliegenden Punkt des Bohrungsrandes. Näher zur Fügefläche liegende Bohrungen (geringere Exzentrizität e , **Bild 3**) sind stärker beansprucht; bei Vergrößerung des Bohrungsradius r_b nimmt die Formzahl α_k zu. Die Untersuchungen zur Übertragungsfähigkeit zeigen, dass die Montagebedingung von untergeordnetem Einfluss ist. Die an den geschwächten Wellen dargestellten Zusammenhänge lassen sich grundsätzlich auf geschwächte Naben übertragen (**Bild 4**).

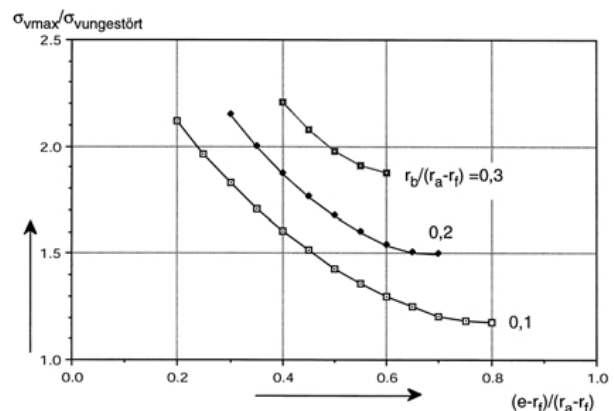


Bild 3: Formzahlen für Naben mit drei Axialbohrungen (ohne Rutschen); $r_f/r_a = 0,5$

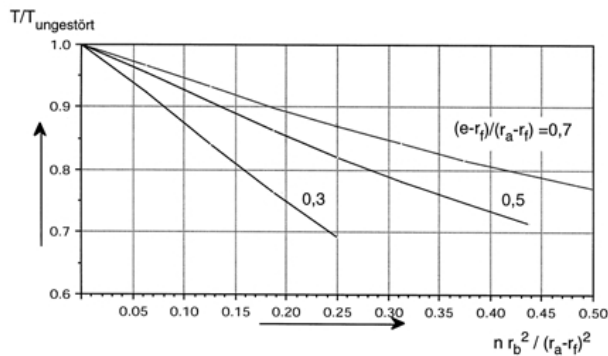


Bild 4: Übertragungsfähigkeit für Naben mit Axialbohrungen

2.1.3 Nabe mit Radialbohrungen

Die maximalen Bohrungsrandspannungen liegen immer bei dem zur Stirnfläche am nächsten liegenden Punkt des Bohrungsrandes an der Fügefläche (**Bild 5**, Punkt A). Ebenso wie bei Naben und Wellen mit Axialbohrungen spielt die minimale Wandstärke t_{bs} die entscheidende Rolle. Bohrungen nahe der Stirnfläche verursachen starke Spannungserhöhungen am Bohrungsrand.

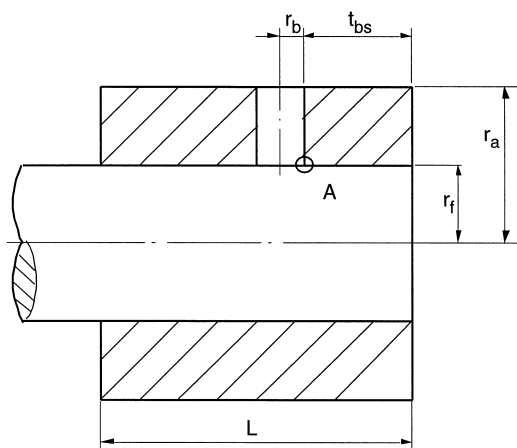


Bild 5: Geometrische Bezeichnungen an Naben mit Radialbohrungen

Bei der Übertragungsfähigkeit ist zu beachten, dass die auf der Fügefläche auftreffenden Bohrungen „Leerstellen“ darstellen, die bei der Berechnung der Übertragungsfähigkeitskennzahl η durch den Fugenleergrad λ_F berücksichtigt werden, **Gleichung (5)** und **Gleichung (6)**:

$$\eta = \frac{T}{T_{\text{ungestört}}} = \lambda_F \cdot \frac{\bar{p}}{q} \quad (5)$$

$$\lambda_F = \frac{2\pi \cdot r_F \cdot L - n\pi \cdot r_b^2}{2\pi \cdot r_F \cdot L} = 1 - \frac{n\pi \cdot r_b^2}{2\pi \cdot r_F \cdot L} \quad (6)$$

Bild 6 zeigt die Übertragungsfähigkeit für Naben mit zwei Radialbohrungen. Die Untersuchungen

führen auch hier zu der Erkenntnis, dass der durchschnittliche Fugendruck p und das übertragbare Drehmoment T unabhängig von der Montage-bedingung sind.

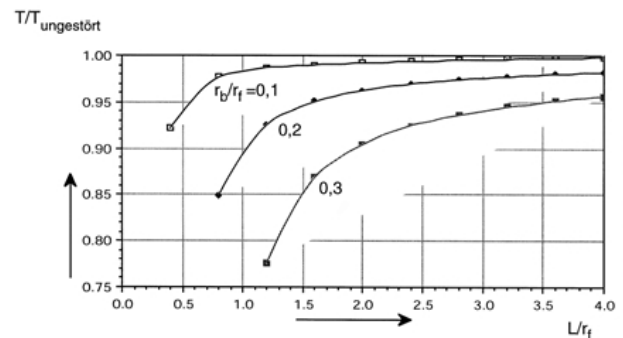


Bild 6: Übertragungsfähigkeit von Naben mit zwei Radialbohrungen

2.2 Teilplastische Auslegung geschwächter Pressverbindungen

Zur Steigerung der Übertragungsfähigkeit werden in vielen Fällen teilplastische Verformungen an Maschinenelementen zugelassen, ohne dass durch das Überschreiten der Elastizitätsgrenze mit einem sofortigem Ausfall der Verbindung gerechnet werden muss.

Zur Simulation der elastisch-plastischen Materialeigenschaften der Konstruktionswerkstoffe wird ein linear verfestigendes Verhalten nach **Bild 7** approximiert, für den der Extremfall $E_{pl} = 0$ das elastisch-idealplastische Verhalten darstellt. Als Fließ-bedingung wird die Gestaltänderungsenergiehypothese gewählt.

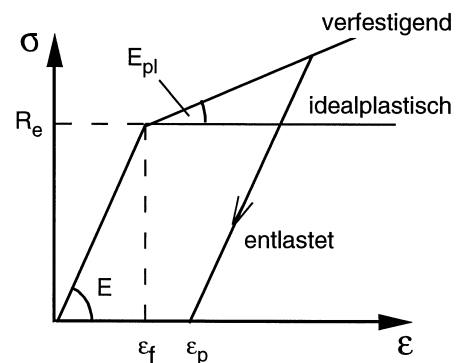


Bild 7: Spannungs-Dehnungs-Diagramm zur teilplastischen Auslegung geschwächter Pressverbindungen

Da teilplastische Probleme nichtlinear sind, sind die in **Abschnitt 2.1** vorausgesetzten Bedingungen für eine dimensionslose Darstellung der Ergebnisse nicht mehr gegeben. Für die teilplastische Auslegung kann jedoch näherungsweise eine dimensionslose Darstellung erreicht werden, wenn bei ausreichender Stützwirkung der verbleibenden

elastischen Gebiete die Verschiebungen und Verzerrungen der plastischen Zone die gleiche Größenordnung wie in der elastischen Zone aufweisen, die Untersuchungen beschränken sich daher auf kleine plastische Verformungen. **Bild 8** zeigt am Beispiel einer durch Axialbohrungen geschwächten Welle ohne Montagereibung die plastischen Zonen bei zunehmendem Übermaß. Die vom Bohrungsrand mit der höchsten Spannung ausgehende plastische Zone nimmt mit steigendem Übermaß zu und erreicht schließlich im Grenzfall die Fügefläche. Bei mehreren Bohrungen können sich auch die plastischen Zonen treffen.

Für das in Bild 8 abgebildete Beispiel zeigt **Bild 9** den auf die Streckgrenze bezogenen durchschnittlichen Fugendruck p in Abhängigkeit vom auf die elastische Grenzdehnung e_f bezogenen Übermaß \bar{u} .

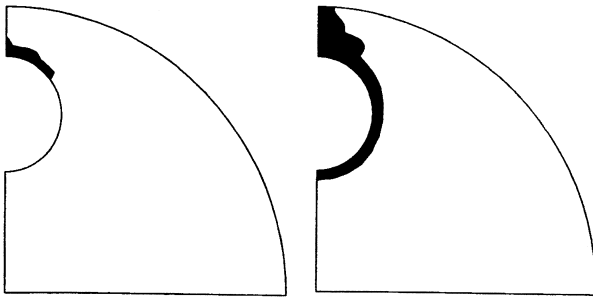


Bild 8: Plastische Zonen einer Welle mit zwei Axialbohrungen ohne Montagereibung; $r/b = 0,2$; $e/r = 0,625$; $Q_N = r/f/a = 0,5$; a) $\bar{u}/\bar{u}_{\text{egrenz}} = 1,1$; b) $\bar{u}/\bar{u}_{\text{egrenz}} = 1,4$

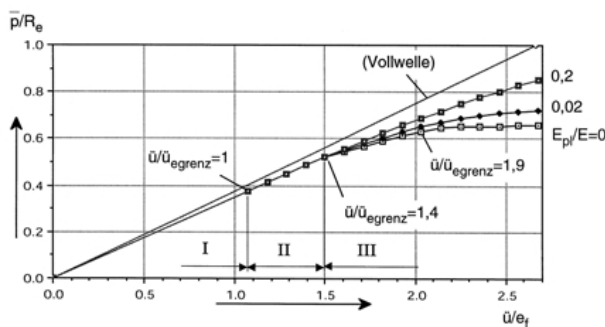


Bild 9: Fugendruck-Übermaß-Verhältnis einer Welle mit zwei Axialbohrungen ohne Montagereibung; $r/b = 0,2$; $e/r = 0,625$; $Q_N = r/f/a = 0,5$

Solange die maximale Bohrungsrandspannung $\sigma_{v\max}$ kleiner als die Streckgrenze R_e ist, wird die Welle rein elastisch beansprucht (Bereich I, Bild 9).

Wenn die maximale Bohrungsrandspannung $\sigma_{v\max}$ die Streckgrenze R_e erreicht, wird die Welle rein elastisch am stärksten beansprucht. Der elastische

Grenzdruck p_{egrenz} und das elastische Grenzübermaß \bar{u}_{egrenz} werden erreicht.

Mit $\sigma_{v\max}$ wird die Welle teilplastisch beansprucht. Solange die dünnste Stelle der Bohrungswand zwischen Bohrung und Fügefläche oder zwischen Nachbarbohrungen nicht vollplastisch beansprucht ist, weicht der durchschnittliche Fugendruck p nur „geringfügig“ von der Linearität zum Übermaß \bar{u} ab (Bereich II). Durch die Stützwirkung der verbleibenden elastischen Zone behält die plastische Dehnung e_{pl} am Bohrungsrand die gleiche Größenordnung wie die Dehnung an der Streckgrenze e_f . Im Vergleich zur rein elastischen Auslegung kann sich die Übertragungsfähigkeit in diesem Beispiel mit zulässigen plastischen Verformungen um 40% vergrößern.

Mit Erreichen der vollplastischen Durchverformung krümmen sich die Fugendruck-Übermaß-Linien stärker mit abnehmendem Verfestigungsersatzmodul E_{pl} (Bereich III).

3 Vergleich mit experimentellen Untersuchungen

Zur Untersuchung von Bauteilen und Maschinenelementen bei statischer und dynamischer Belastung sowie unter tribologischen Gesichtspunkten existieren am Institut für Maschinenwesen zahlreiche, zum Teil selbst konstruierte und in Eigenfertigung hergestellte Prüfstände. Der servohydraulische Prüfstand wird zur Bestimmung der quasistatischen und dynamischen Torsionsbelastung eingesetzt.

Der in **Bild 10** dargestellte Prüfstand kann sowohl für statische als auch für dynamische Bauteiluntersuchungen unter reiner Drehmomentbelastung verwendet werden. Das Drehmoment wird durch eine servohydraulische Stelleinheit (Hydroschwinger) erzeugt. Durch Vorgabe eines elektrischen Stellsignals (Sollsignal) an zwei gegenseitig geschaltete Servoventile wird die durch eine externe Hydraulikpumpe erzeugte hydraulische Energie über den Ventilblock in zwei Druckkammern innerhalb des Schwingers geleitet. Der Druck wirkt auf zwei auf der Antriebswelle befestigte Flügel, die infolge Druck und Ölvolumenstrom gegenüber dem Schwingergehäuse bewegt und verspannt werden. Der Prüfstand kann ein maximales Torsionsmoment von ca. 2500 Nm aufbringen, die Erzeugung einer überlagerten Biegebelastung ist nicht möglich.



Bild 10: Servohydraulischer Prüfstand für Bauteiluntersuchungen bei reiner Drehmomentbelastung

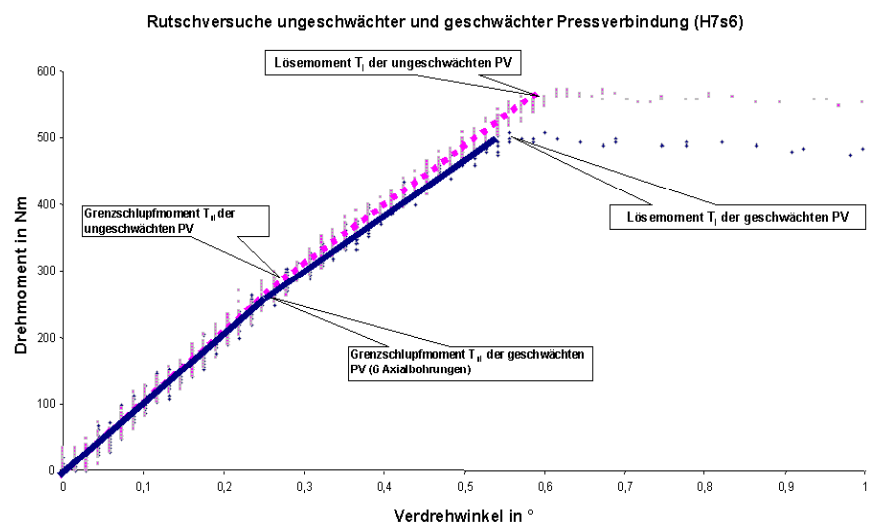
Der Antriebsstrang verfügt zur Vermeidung von Biegung, Querkraft und Fluchtungsfehlern über eingebaute Membrankupplungspaare. Die doppelt angeordneten Membrankupplungen sind extrem torsionssteif und biegeweich, wodurch die infolge Fertigungsabweichungen und die selbst bei hoher Ausrichtungspräzision der Prüfstandsteile und der Prüflinge entstehenden Fluchtungsfehler wirksam vermieden werden können. Die Drehmomentübergabe vom Hydroschwinger auf die Testverbindung erfolgt durch einen außenwirkenden Spannsatz, das Reaktionsmoment wird durch eine reibschlüssige Klemmung des Nabenflansches in einer Lagerungseinheit erzeugt. Die Belastungsaufgabe wird über einen externen Frequenzgenerator vorgenommen, die Überwachung des Verdrehwinkelbereiches erfolgt über einen eingebauten Winkelaufnehmer.

Die Regelung des Prüfstands (drehmoment- bzw. winkel geregelter Prüfbetrieb) wird durch eine Analogelektronik vorgenommen. Wird der zulässige Verdrehwinkelbereich z.B. durch unzulässig große Deformationen oder Bruch des Prüflings überschritten, schaltet die angeschlossene SPS den Prüfstand ebenso automatisch ab, wie bei einer zu hohen Hydrauliköltemperatur oder bei Absinken des Ölstandes im Tank infolge Leckage. Die Messwertspeicherung (Sollsignal, Drehmoment, Verdrehwinkel) geschieht durch einen PC.

3.1 Quasistatische Torsionsbelastung

Mit dem Aufbringen eines quasistatischen Torsionsmomentes wurden die Lösemomente geschwächter und ungeschwächter Verbindungen vor einer dynamischen Torsionsbelastung ermittelt.

In **Bild 11** ist der Drehmomentenverlauf bei statischer Verdrehung einer ungeschwächten und geschwächten PV dargestellt. Bis zu einer bestimmten Größe des schlupflosen Torsionsmomentes (T_{sl}) erfolgt die Verformung der Fügeflächen von Welle und Nabe ohne Relativbewegungen. Beim Überschreiten der schlupflosen Belastung treten örtliche Verschiebungen zwischen den Fügeflächen auf. Dieser Bereich des örtlichen Gleitens ist die Gleitzone, die, wenn sie sich über die gesamte Pressfuge ausgebreitet hat, zum Durchrutschen der Nabe auf der Welle führt. Der Vergleich zwischen geschwächter und ungeschwächter PV zeigt, dass das schlupflose Torsionsmoment und das Lösemoment bei einer ungeschwächten PV einen grundsätzlich höheren Wert annimmt als bei einer



ver-

Bild 11: Vergleich des Grenzschlupfmomentes geschwächter und ungeschwächter Pressverbindungen bei gleichem absolutem Übermaß, $d=30$ mm, $D = 60$

gleichbaren geschwächten PV gleicher Toleranzklasse.

Nach Überschreiten des Lösemomentes T_{l1} rutscht die Welle unter der Nabe durch. Bei geschwächten PV fällt das wirkende Rutschmoment T_{r1} stärker ab als bei ungeschwächten PV. Es zeigt sich weiterhin eine fallende Charakteristik des Rutschmoments mit zunehmenden Verdrehwinkel bei geschwächten PV gegenüber einen nahezu gleichbleibenden

Verlauf bei ungeschwächten PV. Die experimentell ermittelten Rutschmomente liegen sämtlich über den von Tan Li angegebenen Verminderungsfaktoren der Übertragungsfähigkeit (Bilder 2,4,6).

Ausgehend vom Grenzwert des Übermaßes für eine rein elastische Auslegung einer Pressverbindung kann eine Steigerung der Übertragungsfähigkeit durch Zulassen einer Teilplastifizierung des Materials erreicht werden. Dies wurde bei der Passungsauswahl für eine bestimmte Anzahl der Proben berücksichtigt.

Die Rutschversuche führen weiterhin zu der Erkenntnis, dass das übertragbare statische Drehmoment kaum durch die Rauigkeit der spanabhebend bearbeiteten Nabenbohrungen beeinflusst wird. Verbindungen, deren Oberflächen über höhere gemittelte Rauhtiefen verfügen, übertragen durchschnittlich um 2-5% höhere Drehmomente bei statischer Belastung als geometrisch gleichartige Varianten mit geringerer Rauhtiefe. Entscheidend ist die Richtung der Rauigkeit. Ungerichtete Oberflächenrauigkeiten, wie sie z.B. aus dem Kugelstrahlen resultieren, führen zu höheren Haftbeiwerten als gerichtete Rauigkeiten (z.B. Drehriefen), die im Falle der Drehmomentbelastung zusätzlich noch mit der Belastungsrichtung übereinstimmen.

3.2 Dynamische Torsionsbelastung

Der überwiegende Teil der Erprobungsträger wurde auf dem 75% des maximalen Rutschmoments über mindestens 5×10^6 Lastwechsel getestet. Grundsätzlich konnte bei allen untersuchten Verbindungen nie ein Bruch im Fügebereich beobachtet werden. Das Austreten von Passungsrost, der für Kontaktpartner unter oszillierenden Bewegungen charakteristisch ist, konnte ebenfalls nicht festgestellt werden.

In **Bild 12** ist exemplarisch der Einfluss der Schwächung an einer radial geschwächten PV dargestellt. Es lassen sich deutlich die Einflussbereiche der Schwächung erkennen. In der benachbarten Zone ist die Schlupftiefe und die Reibrostbildung deutlich geringer ausgeprägt.

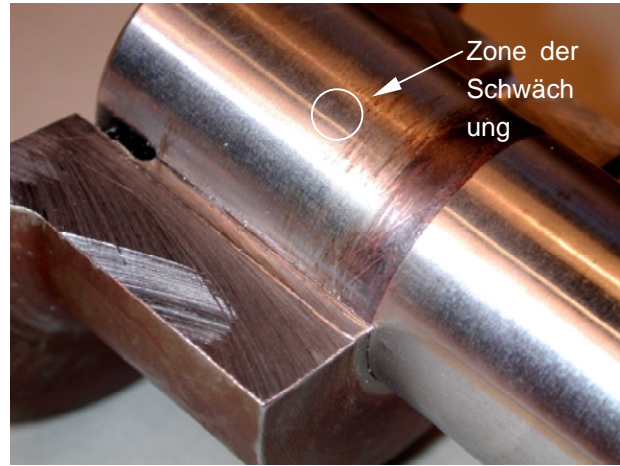


Bild 12: Verschleißspuren an einer Pressverbindung mit radial geschwächter Nabe

Eine Abschätzung der Reibdauerbeanspruchung nehmen Leidich /4/ und Gropp /7/ vor. Sie definieren eine spez. Reibarbeit, die bei Unterschreitung des Wertes zu einer geringeren Reibkorrosion führt und einen Riß im Fugebereich nicht erwarten läßt. Insbesondere wenn der Schlupf s unter dem tribologisch noch unschädlichen relativen Grenzschlupf ($s/D_F = 2,6 \cdot 10^{-6}$) bleibt. Die spez. Reibarbeit wird bei der radial geschwächten Pressverbindung im Bereich der Nabenkante und im Einflussbereich der Schwächung durch die erhöhte Fugenpressung sowie den höheren relativen Schlupf überschritten. Das Ergebnis ist ein stärkerer Reibkorrosionsfortschritt, vgl. Bild 12.

4 Zusammenfassung

Pressverbindungen dienen zum Übertragen von Kräften und Momenten zwischen Welle und Nabe durch Kraftschluss. Funktions- und montagebedingt sind beide Bauteile oftmals mit Axial- oder Radialbohrungen versehen. Diese lokalen Schwächungen führen aufgrund verringerter Bauteilstifigkeiten zu einem verringerten Pressfugendruck und zu Spannungsüberhöhungen im Bereich der Bohrungen. Daher kann der Tragfähigkeitsnachweis nicht mehr mit den Berechnungsvorschriften ungeschwächter Verbindung erfolgen. Durch umfangreiche numerische Untersuchungen verschiedener geschwächter Wellen- und Nabengeometrien ist ein Berechnungsansatz für geschwächte Welle-Nabe-Pressverbindungen erarbeitet worden, der durch die Berücksichtigung von teilplastischen Materialbeanspruchungen eine wesentliche Erhöhung der Übertragungsfähigkeit ermöglicht.

Experimentelle Untersuchungen an ausgeführten Verbindungen bestätigen eindrucksvoll die Richtigkeit des erweiterten Berechnungsansatzes.

5 Literatur

- /1/ Dietz, P.; Tan, L.: Beanspruchungen und Übertragungsfähigkeit geschwächter Welle-Nabe-Preßverbindungen. Antriebstechnik 35 (1996), Heft 4/5
- /2/ Kollmann, F.G.: Welle-Nabe-Verbindungen. Konstruktionsbücher Bd.32, Springer-Verlag, 1984
- /3/ DIN 7190 Preßverbände, Beuth-Verlag, 1988
- /4/ Leidich, E.: Beanspruchung von Pressverbänden im elastischen Bereich und Auslegung gegen Dauerbruch. Diss. TH Darmstadt, 1983
- /5/ Gropp, H.: Die Übertragungsfähigkeit von Längspreßverbindungen bei dynamischer Belastung durch wechselnde Drehmomente. Diss. TH Karl-Marx-Stadt, 1973
- /6/ Tan, L.: Beanspruchungen und Übertragungsfähigkeit der geschwächten Welle-Nabe-Preßverbindungen im elastischen und teilplastischen Bereich. Diss. TU Clausthal, 1993
- /7/ Gropp, H.: Das Übertragungsverhalten dynamisch belasteter Pressverbindungen und die Entwicklung einer neuen Generation von Pressverbindungen. Habilitationsschrift Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik, 1997